

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПОТОКА РОТОРА АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

1. Введение

Решение проблемы энергосбережения существенным образом зависит от повышения энергетической эффективности электромеханических систем на базе асинхронных машин (АМ). На сегодняшний день среди всех типов электроприводов, применяемых в промышленности, асинхронный электропривод (АЭП) занимает доминирующее место. Асинхронные генераторы (АГ) используются значительно реже двигателей. Одной из перспективных сфер их применения являются ветровые электростанции. С другой стороны, во многих технологических применениях работа АЭП включает довольно длительные периоды электромагнитного торможения, где АМ функционирует как АГ.

Фундаментальные исследования вопросов повышения энергетических показателей АМ за счет оптимального управления магнитным потоком были выполнены довольно давно [1]-[4]. Тогда же был сделан справедливый в общем случае вывод о том, что необходимым условием достоверности решения задачи оптимизации по минимуму потерь является учет насыщения магнитопровода машины. В [5] было предложено графоаналитическое решение этой задачи.

Вместе с тем поиск вариантов аналитического решения задачи оптимизации потерь в АМ, где, как известно, не может быть учтена нелинейность кривой намагничивания, продолжает привлекать внимание специалистов. Об этом свидетельствует появление в последнее десятилетие ряда работ [6]-[14], где на основе упрощенных в различной степени моделей потерь и без учета насыщения

определяется значение потока, снижающее потери. Как оказывается, решения такого рода в настоящее время имеют свою сферу практического применения.

Дело в том, что теоретически возможная и фактически достижимая зоны оптимизации в действительности могут значительно отличаться. Так, зона оптимизации потерь будет сужена при невозможности получения на выходе силового преобразователя АЭП напряжения, превышающего номинальное напряжение питания АМ. Кроме этого, зона оптимизации может быть ограничена с целью не допустить ухудшения показателей качества управления в системе за счет минимизации потерь.

Задача энергосбережения обычно возлагается на соответствующую подсистему, которая функционирует в составе общей системы управления АЭП. Причем от системы в целом в первую очередь требуется обеспечение необходимого качества управления механическими координатами, а задача энергосбережения имеет более низкий приоритет. На сегодня высокие показатели динамики и статики обеспечивают системы векторного управления АМ. В таких системах, кроме собственно задачи векторного управления, необходимо решать задачи оценки вектора потокосцепления ротора, идентификации термозависимого сопротивления ротора и адаптации параметров системы к его изменениям, а иногда (при отсутствии датчика) и задачу оценки скорости вращения вала [15]. В традиционных решениях этого сложного комплекса задач не предполагается возможности вхождения машины в состояние существенной насыщенности, влекущего за собой значительные изменения магнитозависимых параметров [15], [16]. Как следствие, при реализации в таких системах энергетически эффективного управления (ЭЭУ) выдвигается требование ограничивать сверху магнитный поток вблизи номинального [17].

Таким образом становится ясным, что для описанного класса систем управления АМ допустимая зона оптимизации потерь будет меньше теоретически возможной. По сути здесь из возможных при оптимизации направлений

изменения магнитного потока как вниз, так и вверх от номинального уровня, допускается только первое. А в таких условиях аналитическое решение задачи оптимизации потерь в АМ уже может конкурировать с решением этой же задачи, учитывающим насыщение магнитопровода, поскольку в первом случае практическая реализация ЭЭУ является более простой, а точность оптимизации, как показано в разд.5 настоящей статьи, может быть довольно неплохой.

В данной работе, в отличие от [6]-[14], рассмотрена расширенная модель потерь мощности в АМ, близкая по полноте к модели потерь в [2]. Она включает активные и магнитные потери в статоре и роторе, дополнительные и механические потери. В пределах этой модели получено уравнение 8-й степени относительно энергетически оптимального значения потока ротора АМ, имеющее ряд нулевых коэффициентов, и найдено аналитическое решение этого уравнения. Получен упрощенный вариант этого решения, предназначенный для практического применения в энергосберегающих АЭП. Проведен анализ ЭЭУ и рассмотрен вопрос точности оптимизации потерь.

Для расчетов в статье использовался типовой асинхронный двигатель мощностью 2,2 кВт, а в разд.5 также и двигатель мощностью 30 кВт.

2. Математическое описание АМ с векторным управлением

При ориентации системы движущихся координат (d, q) по обобщенному вектору потокосцепления ротора $\bar{\Psi}_r$ машины, математическое описание идеализированной короткозамкнутой АМ будет соответствовать следующей системе дифференциальных уравнений [16]:

$$\begin{aligned} d\Psi_r/dt &= -\Psi_r/T_r + I_d L_m/T_r \\ dI_d/dt &= -I_d/T_s + U_d/L'_s + (\omega_0 L'_s I_q + K_r \Psi_r/T_r)/L'_s \\ dI_q/dt &= -I_q/T_s + U_q/L'_s - (\omega_0 L'_s I_d + K_r \Psi_r z_p \omega)/L'_s \\ d\omega/dt &= (M_E - M_H)/J, \end{aligned} \tag{1}$$

где Ψ_r , I_d , I_q , ω - соответственно модуль вектора потокосцепления ротора АМ, потоковая и моментная составляющие вектора тока статора, и угловая скорость вращения ротора машины; U_d , U_q - составляющие вектора напряжения статора; ω_0 - угловая скорость вращения вектора $\bar{\Psi}_r$; $M_E = K_M \Psi_r I_q$ - электромагнитный момент машины; M_H - момент нагрузки АМ; z_p - число пар полюсов; J - суммарный момент инерции ротора машины; $T_s = L'_s / R'_s$, $T_r = L_r / R_r$ - соответственно постоянные времени статора и ротора АМ; $L'_s = L_{s\sigma} + K_r L_{r\sigma}$; $R'_s = R_s + K_r^2 R_r$; R_s , R_r - активные сопротивления фаз статора и ротора соответственно; $K_r = L_m / L_r$; $K_M = 3 z_p K_r / 2$; $L_{s\sigma} = L_s - L_m$, $L_{r\sigma} = L_r - L_m$ - индуктивности от полей рассеивания; L_m , L_s , L_r - взаимная индуктивность между статором и ротором, и полные индуктивности фазы статора и ротора соответственно. Угловая скорость вращения вектора потокосцепления ротора АМ будет определяться как

$$\omega_0 = \omega z_p + \omega_s, \quad (2)$$

где $\omega_s = K_r R_r I_q / \Psi_r$ - угловая скорость скольжения машины.

3. Получение уравнения для определения оптимального значения Ψ_r

Среди основных потерь мощности в АМ выделяют активные (омические) потери в статоре и роторе, магнитные потери в статоре и роторе, дополнительные потери и механические потери. Запишем выражения для составляющих полных потерь мощности в установившихся режимах работы АМ.

Омические потери в машине, при пренебрежении влиянием на активные сопротивления поверхностного эффекта и имея в виду то, что в

сориентированной по полю ротора АМ системе координат модуль вектора тока ротора равен $I_r = K_r I_q$, будут определяться как

$$P_{cu} = 1,5 \left[(I_d^2 + I_q^2) R_s + I_q^2 K_r^2 R_r \right]. \quad (3)$$

Магнитные потери в стали статора АМ будут равны

$$P_{fe,s} = 1,5 \Psi_m^2 (K_h |\omega_0| + K_e \omega_0^2), \quad (4)$$

где $\Psi_m = |\bar{\Psi}_m|$; $\bar{\Psi}_m$ - вектор потокосцепления в воздушном зазоре АМ; K_h - коэффициент потерь от гистерезиса; K_e - коэффициент потерь от вихревых токов. Магнитные потери в роторе по своей природе аналогичны магнитным потерям в статоре, однако они являются функцией частоты тока в роторе. На основании [18] эти потери могут быть определены как

$$P_{fe,r} = 1,5 \Psi_m^2 \left(K_h |s \omega_0| + K_e (s \omega_0)^2 \right), \quad (5)$$

где $s = (\omega_0 - z_p \omega) / \omega_0$ - скольжение АМ.

Дополнительные потери мощности в АМ согласно [19] могут быть определены как

$$P_a = 1,5 K_a \omega^2 I_r^2, \quad (6)$$

где K_a - коэффициент дополнительных потерь в АМ. Механические потери на валу машины от вязкого трения будут равны

$$P_\omega = K_\omega \omega^2, \quad (7)$$

где K_ω - коэффициент механических потерь.

Учитывая то, что в сориентированной по полю ротора АМ системе координат в установившихся режимах справедливо соотношение $\Psi_m^2 = \Psi_r^2 + I_q^2 K_r^2 L_{r\sigma}^2$, на основании формул (4), (5) и (2) получим выражение для магнитных потерь в машине в виде

$$P_{fe} = 1,5 \left[\left(\Psi_r^2 + (I_q K_r L_{r\sigma})^2 \right) \left(K_h (|\omega_0| + |\omega_s|) + K_e (\omega_0^2 + \omega_s^2) \right) \right]. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что выражения для составляющих электромагнитных потерь (3)-(6) и (8) будут справедливыми только для установившихся процессов работы АМ, оптимизация которых здесь и рассматривается. В частности, в сориентированной по $\bar{\Psi}_r$ системе координат при $d\Psi_r/dt \neq 0$ равенство $I_r = K_r I_q$ не будет справедливо. При $dM_E/dt \neq 0$, как показано в [3], угловые скорости векторов $\bar{\Psi}_m$ и $\bar{\Psi}_r$ будут различны, однако это не учтено в выражениях потерь (4), (5), записанных в функции скорости вектора $\bar{\Psi}_r$.

Суммарные потери мощности в машине будут равны

$$P = P_{cu} + P_{fe} + P_a + P_\omega. \quad (9)$$

Для установившихся процессов при $M_E = const$, $\omega = const$ из (1) и (2) получим следующие выражения:

$$I_d = \Psi_r / L_m, \quad I_q = M_E / (K_M \Psi_r), \quad \omega_s = K_r R_r M_E / (K_M \Psi_r^2). \quad (10)$$

Подставив соотношения (10) в (9) с учетом (2), (3) и (6)-(8) получим выражение для потерь мощности в функции потокосцепления ротора

$$P = \frac{3}{2} \left[\left(\frac{\Psi_r^2}{L_m^2} + \frac{M_E^2}{K_M^2 \Psi_r^2} \right) R_s + \frac{M_E^2}{K_M^2 \Psi_r^2} K_r^2 (R_r + K_a \omega^2) + \frac{2}{3} K_\omega \omega^2 + \left(\Psi_r^2 + K_r^2 L_{r\sigma}^2 \frac{M_E^2}{K_M^2 \Psi_r^2} \right) \times \left[K_h \left(\left| z_p \omega + \frac{K_r R_r M_E}{K_M \Psi_r^2} \right| + \left| \frac{K_r R_r M_E}{K_M \Psi_r^2} \right| \right) + K_e \left(\left(z_p \omega + \frac{K_r R_r M_E}{K_M \Psi_r^2} \right)^2 + \left(\frac{K_r R_r M_E}{K_M \Psi_r^2} \right)^2 \right) \right] \right] \quad (11)$$

Теперь, определив для этого выражения производную и приравняв ее к нулю $dP/d\Psi_r = 0$, получим следующее уравнение

$$a \left(\Psi_r^{opt} \right)^8 + b \left(\Psi_r^{opt} \right)^4 + c \left(\Psi_r^{opt} \right)^2 + d = 0, \quad (12)$$

коэффициенты которого равны

$$a = R_s / L_m^2 + K_h z_p |\omega| + K_e (z_p \omega)^2; \quad (13)$$

$$b = -(M_E / K_M)^2 \left(R_s + K_r^2 \left(R_r + K_a \omega^2 + 2K_e R_r^2 + L_{r\sigma}^2 \left(K_h z_p |\omega| + K_e (z_p \omega)^2 \right) \right) \right); \quad (14)$$

$$c = -R_r L_{r\sigma}^2 \left((2K_h + 4K_e z_p |\omega|) \text{sign}(\omega) + 2K_h \text{sign}(M_E) \right) \times (K_r M_E / K_M)^3; \quad (15)$$

$$d = -6K_e (L_{r\sigma} R_r)^2 (K_r M_E / K_M)^4; \quad (16)$$

Уравнение (12) охватывает как двигательный режим работы АМ, где знаки ω и M_E совпадают, так и генераторный режим ее работы, где знаки ω и M_E противоположны. Иными словами, это уравнение адекватно всем 4-м квадрантам координатной плоскости механической характеристики машины $\omega = f(M_E)$. Анализ коэффициентов уравнения (12) позволяет отметить следующие два момента.

а) При вычислении коэффициентов a , b и c согласно выражениям (13)-(15) используется абсолютная величина ω , а также знаки ω и M_E , что в итоге позволяет уравнению (12) адекватно отображать четырехквadrантное функционирование АМ. Если же при вычислении этих коэффициентов вместо $|\omega|$ использовать ω , а также исключить из (15) $\text{sign}(\omega)$ и $\text{sign}(M_E)$, то в данном случае уравнение (12) будет корректным только для работы АМ в 1-м квадранте, где $\omega > 0$, $M_E > 0$.

б) Коэффициент a всегда положителен, а коэффициенты b и d всегда отрицательны или равны нулю. Знак коэффициента c изменяется в зависимости от режима работы АМ: для двигательного режима $c < 0$, а для генераторного режима $c > 0$.

Факт изменения знака коэффициента c уравнения (12) отражает то обстоятельство, что при одних и тех же $|\omega|$ и $|M_E|$ значение экстремума функции потерь мощности (11) для генераторного режима работы машины будет меньше чем для двигательного. Физически это объясняется тем, что в генераторном режиме частота тока статора будет на $2\omega_s$ меньше чем в двигательном, что приведет к уменьшению магнитных потерь в статоре и, соответственно, к уменьшению общих потерь мощности. При этом, как оказывается, оптимальное значение потока ротора в генераторном режиме будет несколько меньше оптимального значения потока ротора в двигательном режиме.

4. Решение уравнения (12) и анализ энергоэффективного управления

Уравнение (12) может быть решено аналитически. Выражение для единственного действительного положительного корня этого уравнения, что суть оптимальное значение Ψ_r^{opt} модуля вектора потокосцепления ротора, минимизирующее функцию (11) потерь $P(\Psi_r^{opt}) \Rightarrow \min$, было получено в следующем виде

$$\Psi_r^{opt} = \frac{1}{6} \sqrt{3\sqrt{6} A + 3 \sqrt{-\frac{1}{a} \left(48b + 6B + C(288ad + 24b^2) + 72\sqrt{6} \frac{c}{A} \right)}}, \quad M_E \neq 0, \quad (17)$$

где

$$A = \sqrt{(B + C(48ad + 4b^2) - 4b)/a}; \quad B = D^{1/3}; \quad C = D^{-1/3};$$

$$D = 108ac^2 - 288abd + 8b^3 + 12a\sqrt{3(128ab^2d^2 - 256a^2d^3 - 16b^4d - 144abc^2d + 27ac^4 + 4b^3c^2)/a}.$$

На рис. 1 - 5 представлены графические зависимости, полученные с помощью выражений (17) и (11) в функции ω и M_E , которые измерялись в относительных единицах (о.е.). Поверхности, представленные на этих рисунках, являются симметричными относительно вертикальной оси, проходящей через центр координат горизонтальной плоскости $\omega, 0, M_E$. На рис.1 представлена зависимость $\Psi_r^{opt} = f(\omega, M_E)$, полученная с помощью (17). Поверхности на рис.2,3 получены с помощью (11) и отображают, соответственно, потери мощности $P^{opt} = f(\omega, M_E)$ при $\Psi_r = \Psi_r^{opt}$ и потери мощности $P^{stb} = f(\omega, M_E)$ при номинальном значении потока ротора $\Psi_r = \Psi_{rn}$. Поверхность на рис.4 представляет зависимость разницы потерь мощности $\Delta P = f(\omega, M_E)$, где $\Delta P = P^{stb} - P^{opt}$.

Рис.4 дает хорошее представление о возможностях экономии электроэнергии в АМ. Кроме того, на этом рисунке можно выделить линии нулевого уровня поверхности ΔP , которые соответствуют равенству потерь мощности при $\Psi_r = \Psi_r^{opt}$ потерям мощности при $\Psi_r = \Psi_{rn}$. С целью более четкого выделения этих линий, на рис.5 представлена поверхность $\chi = f(\omega, M_E)$ для логической переменной χ , определяемой как $\chi = 1, \Psi_r^{opt} \leq \Psi_{rn}; \chi = 0, \Psi_r^{opt} > \Psi_{rn}$. Анализ рис.4,5 позволяет сделать вывод, что линии нулевого уровня разделяют плоскость $\omega, 0, M_E$ на две зоны с признаками количественного и качественного различия. В 1-й зоне, где $\chi = 1$, возможна значительная экономия энергии, причем величина ΔP здесь возрастает при уменьшении $|M_E|$ и при увеличении $|\omega|$. Во 2-й зоне, где $\chi = 0$, также возможна определенная экономия энергии, а возрастание ΔP здесь происходит противоположным образом - при увеличении $|M_E|$ и при уменьшении $|\omega|$. Кроме

этого, реализация ЭЭУ во 2-й зоне, в отличие от 1-й, будет сопровождаться существенным насыщением магнитопровода АМ.

Физически ограничивающим параметром при ЭЭУ АМ является напряжение статора, которое при питании машины от подключенного к стандартной сети типичного силового преобразователя не будет превышать номинального значения. Для определения характера изменения напряжения статора машины, исходя из описания (1) идеализированной АМ получим выражения для компонент U_d , U_q вектора напряжения статора \bar{U}_s в установившихся процессах работы в виде

$$\begin{aligned} U_d &= R'_s I_d - (\omega_0 L'_s I_q + K_r \Psi_r / T_r); \\ U_q &= R'_s I_q + (\omega_0 L'_s I_d + K_r z_p \omega \Psi_r). \end{aligned} \quad (18)$$

Модуль $U_s = |\bar{U}_s|$ вектора напряжения статора АМ будет определяться как

$$U_s = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}. \text{ На рис.6 представлена поверхность } U_s^{opt} = f(\omega, M_E),$$

построенная при $\Psi_r = \Psi_r^{opt}$ на основе (18), где значения I_d , I_q , ω_0 определялись

согласно (10). Анализируя эту поверхность можно отметить, что превышение

U_s^{opt} номинального уровня наблюдается для двигательного режима работы АМ в

области значений ω и M_E , близких к своим номинальным значениям.

Сопоставляя рис.6 с рис.4 и рис.5 видно, что эта область соответствует той части 2-й зоны ЭЭУ АМ, где возможна небольшая экономия энергии. А для

доминирующей части координатной плоскости $\omega, 0, M_E$, включающей

полностью 1-ю зону и большую часть 2-й зоны ЭЭУ, напряжение статора

лимитирующим фактором не является. В генераторном режиме работы при

изменении ω и M_E в пределах своих номинальных значений, как показали

расчеты, создаваемая потокосцеплением в воздушном зазоре машины э.д.с. будет

меньше номинального напряжения статора АМ.

5. Точность оптимизации потерь при использовании (17)

Решение (17) было получено при определенных упрощениях. В частности, магнитная цепь машины рассматривалась как линейная, а также в качестве базового использовалось описание (1) идеализированной АМ, в котором не учитываются магнитные и дополнительные потери мощности. В этой связи целесообразно оценить уровень точности оптимизации при потокоцеплении ротора $\Psi_r = \Psi_r^{opt}$, определяемом по (17).

Для исследования нами использовалось описание потерь в машине вида $P_T = f(\Psi_r, M_E, \omega)$, полученном на основе классической Т-образной схемы замещения, где потери мощности в магнитном сопротивлении R_m , соединенном параллельно с индуктивностью L_m , были эквивалентны потерям (8), а дополнительные потери, определяемые по (6), здесь учитывались путем соответствующего увеличения нагрузки машины. Магнитная цепь в этом описании рассматривалась как нелинейная. Для этого использовалась полученная на основе кривой намагничивания машины зависимость $L_m = L_{mn} \sum_{i=0}^p a_i \Psi_m^{p-i}$, где L_{mn} - значение L_m в номинальном режиме работы АМ; a_i - коэффициенты полинома; $p = 5$.

Методика определения ошибок оптимизации для ряда значений M_E и ω состояла в следующем. Сначала путем численной оптимизации определялся поток ротора Ψ_r^{min} при котором $P_T(\Psi_r^{min}) \Rightarrow \min$ и, далее, вычислялись минимальные потери мощности в машине $P_T^{min} = P_T(\Psi_r^{min})$. После этого определялся Ψ_r^{opt} по (17) при $L_m = const = L_{mn}$ и вычислялись потери мощности

$P_T^{opt} = P_T(\Psi_r^{opt})$, а также вычислялись потери $P_T^{opt*} = P_T(\Psi_r^{opt*})$, где Ψ_r^{opt*} определялся как

$$\Psi_r^{opt*} = \begin{cases} \Psi_r^{opt} & \text{при } 0 < \Psi_r^{opt} \leq \Psi_{rn}, \\ \Psi_{rn} & \text{при } \Psi_r^{opt} > \Psi_{rn}. \end{cases} \quad (19)$$

В итоге вычислялась относительная ошибка оптимизации потерь мощности как $\delta P = (P_T^{opt(opt*)} - P_T^{\min}) / P_n$, где P_n - номинальные потери мощности в АМ.

Графики ошибки оптимизации потерь мощности представлены на рис.7, где кривые 1-3 получены для P_T^{opt} , а кривые 4-6 - для P_T^{opt*} . Также на этом рисунке нанесена разделительная линия, проходящая через точки на кривых ошибки, где выполняется равенство $\Psi_r^{opt} = \Psi_{rn}$. Анализ рис.7 показывает, что слева от разделительной линии максимальная ошибка оптимизации не превышает 1,5 %, причем более значительные ошибки имеют место при меньших ω . По правую сторону от разделительной линии кривые ошибки 1-3 характеризуются резким уходом в область больших значений. А кривые 4-6 сначала опускаются до нулевого уровня, а потом начинают монотонно подниматься не достигая значительных величин ошибки. В точках касания кривыми 4-6 оси абсцисс, очевидно, выполняется равенство $\Psi_r^{\min} = \Psi_{rn}$.

С целью установления общности результатов аналогичный расчет ошибки оптимизации потерь при $\Psi_r = \Psi_r^{opt*}$, определяемым по (19), был выполнен для машины мощностью 30 кВт. При этом использовались две характеристики намагничивания, имеющие коэффициенты насыщения равные 1,3 и 1,5. Максимальные значения ошибки δP при $\Psi_r^{opt} \leq \Psi_{rn}$ составили 0,41 % и 0,7 %, а при $\Psi_r^{opt} > \Psi_{rn}$ - 8,5 % и 6,3 % для 1-й и 2-й характеристик намагничивания соответственно. Для последнего варианта построена поверхность $\delta P = f(\omega, M_E)$, которая представлена на рис.8. На этой поверхности для

большей информативности нанесены линии, где выполняются равенства

$$\Psi_r^{opt} = \Psi_{rn} \text{ и } \Psi_r^{\min} = \Psi_{rn}.$$

Таким образом, представленные на рис.7,8 результаты исследования позволяют заключить, что применение (17) для решения оптимизационной задачи минимизации потерь мощности в АМ приемлемо при выполнении условия

$$0 < \Psi_r^{opt} \leq \Psi_{rn}. \quad (20)$$

При этом возможно достижение точности оптимизации порядка 1-3 % от номинальных потерь, уровень которой можно считать средним уровнем точности. Для $\Psi_r^{opt} > \Psi_{rn}$ выражение (17) не обеспечивает приемлемой точности оптимизации потерь. Высокую точность в этом случае можно получить с помощью графоаналитического метода [5] или численного метода решения задачи минимизации потерь.

На плоскости $\omega, 0, M_E$ условие (20) выполняется в 1-й зоне ЭЭУ (рис.5), которая и будет являться зоной оптимизации при использовании (17). Вместе с тем при потоке ротора $\Psi_r = \Psi_r^{opt*}$, определяемом по (19), как следует из рис.7,8, отклонение потерь от минимально возможных будет достигать довольно умеренных значений также и во 2-й зоне ЭЭУ при $M_E \leq M_{En}$. Этот факт согласуется с сделанным в [2] (с.197-198) выводом, что при стабилизации потока на номинальном или несколько более высоком уровне в диапазоне нагрузок $(0,5 - 1)M_{En}$ потери в АМ будут не намного отличаться от минимальных.

Следует отдельно сказать о случае применения так называемых высокоэкономичных АМ (high-efficiency induction machines) [20]. В этих машинах за счет увеличения массы обмоток и железа достигаются повышенные энергетические показатели. Как следует из сравнения приведенных в [20] (рис.7) кривых намагничивания обычной и высокоэкономичной машин, последняя отличается значительно большим линейным участком, который простирается

почти до номинального значения потока. Это обстоятельство позволяет заключить, что в случае использования высокoeкономичных АМ ошибка оптимизации потерь будет меньше.

Необходимо отметить, что для вычисления Ψ_r^{opt} в реальном времени при практической реализации ЭЭУ выражение (17) может быть упрощено за счет пренебрежения параметром $L_{r\sigma}$ в силу его относительной малости. Как показывают расчеты, на точности оптимизации это существенно не сказывается. Полагая в (17) $L_{r\sigma} = 0$, получим довольно компактную формулу

$$\Psi_r^{opt} \cong \sqrt{|M_E|} \sqrt{\frac{1}{K_M} \sqrt{\frac{R_s + K_r^2 (R_r + 2K_e R_r^2 + K_a \omega^2)}{R_s/L_m^2 + K_h z_p |\omega| + K_e z_p^2 \omega^2}}}. \quad (21)$$

Подводя итоги изложенному выше, следует сказать о практическом применении полученных результатов. Одной из областей возможного применения уравнения (12) и его решения (17) являются аналитические исследования, такие как определение чувствительности энергетически оптимальной системы управления АЭП или АГ к параметрическим возмущениям, или оценивание показателей точности оптимизации. Другим вариантом применения (17) может быть получение эталонных образов при обучении нейронных сетей [21].

Обученная сеть будет определять Ψ_r^{opt} на основании сигналов ω и M_E .

Выражение (21) целесообразно применять для расчета Ψ_r^{opt} в темпе реального времени при практической реализации энергосберегающего управления АМ.

6. Выводы

- В установившихся процессах двигательного и генераторного режимов работы АМ потери мощности, описываемые моделью (9), будут достигать своего минимума при потоке ротора, определяемом по выражению (17).

- На плоскости $\omega, 0, M_E$ выделяются две зоны ЭЭУ АМ, разделенные между собой линиями нулевого уровня экономии энергии. В 1-й зоне, которая находится между этими линиями и где возможна существенная экономия энергии, аналитическое решение задачи оптимизации потерь позволяет получить средний уровень точности. При ограничении потока сверху вблизи номинального уровня отклонение потерь от минимально возможных будет сравнительно небольшим и во 2-й зоне ЭЭУ для нагрузок АМ не превышающих номинальной.
- Алгоритм формирования потокосцепления ротора $\Psi_r = \Psi_r^{opt*}$ при определении Ψ_r^{opt*} по (19), а Ψ_r^{opt} по (21) целесообразно применять для практической реализации режима оптимизации потерь в системах управления АМ, где не допускается функционирование машины при значительной насыщенности магнитопровода.

7. Литература

1. Вакуленко К.Н., Агабабян Э.М. Об оптимальном регулировании асинхронного двигателя // В кн.: Электромашиностроение и электрооборудование, вып.1. – Харьков: изд. ХГУ, 1965. –С. 92-98.
2. Сандлер А. С., Сарбатов Р. С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.
3. Шрейнер Р.Т., Дмитриенко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
4. Kirschen D.S., Novotny D.W., Suwanwisoot W. Minimizing induction motor losses by excitation control in variable frequency drives, IEEE Trans. Ind. Applicat., 1984, Vol. 20, No.5, pp.1244-1250.
5. Шрейнер Р.Т., Поляков В.Н. К расчету оптимального по минимуму потерь закона частотного управления асинхронным электродвигателем. – В кн.: Асинхронный тиристорный электропривод. – Свердловск: изд. УПИ, 1971. – С. 96-98.
6. Garcia G.O., Mendes J.C., Stephan R.M. et al. An Efficient Controller for an Adjustable Speed Induction Motor Drive // IEEE Trans. Ind. Elec., 1994, Vol. 41, No.5, pp. 533-539.
7. Matsuse K., Katsuta S., Tsukakoshi M. et al. Fast Rotor Flux Control of Direct-Field-Oriented Induction Motor Operating at Maximum Efficiency using

- Adaptive Rotor Flux Observer, Conf. Record IEEE-IAS Annual Meeting, 1995, pp. 327-334.
8. *Chang J.H., Kim B.K.* Minimum-Time Minimum-Loss Speed Control of IM Under Field-Oriented Control // IEEE Trans. Ind. Elec., 1997, Vol.44, No.6, pp. 809-815.
 9. *Rasmussen K.S., Thogersen P.* Model Based Energy Optimazer for Vector Controlled IMD // Procced. of EPE' 97 Conf., Trondheim, 1997, pp. 3.711-3.716.
 10. *Wasynczuk O., Sudhoff S.D., Corzine K.A. et al.* A Maximum Torque per Ampere Control Strategy for Induction Motor Drives // IEEE Trans. Ener. Convers. 1998, Vol. 13, No.2, pp. 163-169.
 11. *Abrahamsen F., Blaabjerg F., Pedersen J.K. et al.* On the energy optimized control of standard and high-efficiency induction motors in CT and HVAC applications, IEEE Trans. Ind. Applicat., 1998, Vol. 34, No 4, pp. 822 –831.
 12. *Leidhold R., Garcia G.* Losses minimization in a variable speed field-oriented controlled induction generator // Procced. of IECON'98 Conf., IEEE, New York, 1998, Vol.2, pp. 865-870.
 13. *Matsuse K., Yoshizumi T., Katsuta S. et al.* High-Response Flux Control of Direct-Field-Oriented Induction Motor with High Efficiency Taking Core Loss into Account // IEEE Trans. Ind. Applicat., 1999, Vol. 35, No.1, pp.62-69.
 14. *Matsuse K., Taniguchi S., Yoshizumi T. et al.* A speed-sensorless vector control of induction motor operating at high efficiency taking core loss into account, IEEE Trans. Ind. Applicat., 2001, Vol. 37, No.2, pp. 548-558.
 15. *Vas P.* Vector control of AC machines, Oxford University Press, Oxford, 1994.
 16. *Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями/ О.В. Слежановский, Л.Х. Дацковский, И.С. Кузнецов и др. -М.: Энергоатомиздат, 1983. - 256 с.*
 17. *Энергетически эффективные алгоритмы управления асинхронными двигателями электромеханических систем. / Попович Н.Г., Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Король С.В. // Труды науч. – техн. конф. Проблемы автоматизированного электропривода, Алушта, 2000. –С. 25-29.*
 18. *Sousa G.C.D., Bose B.K., Cleland J.* Loss modeling of Converter Induction Machine System for Variable Speed Drive // Proceed. of IECON'92 Conf., IEEE, New York, 1992, Vol.1, pp.114-120.
 19. *Kioskeridis I., Margaris N.* Loss Minimization in Scalar-Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers // IEEE Trans. Pow. Elec., 1996, Vol. 11, No.2, pp. 213-220.
 20. *Khater F., Lorenz R.D., Novotny D.W., et al.* Selection of flux level in flied-oriented induction machine controllers with consideration of magnetic saturation effects, IEEE Trans. Ind. Applicat., 1987, Vol. IA-23, No 2, pp. 276 –281.
 21. *Hasan K.M., Zhang L., Singh B.* Neural network control of induction motor drives for energy efficiency and high dynamic performance // Proceed. of IECON'97 Conf., IEEE, New York, 1997, Vol.2 pp. 488-493.

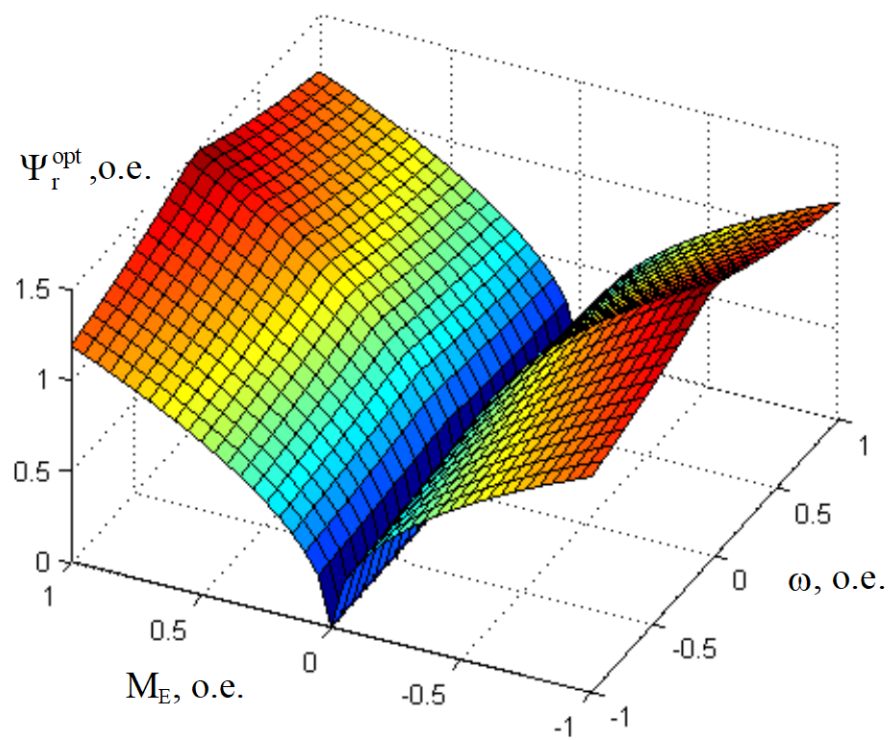


Рис.1. Энергетически оптимальный поток ротора АМ

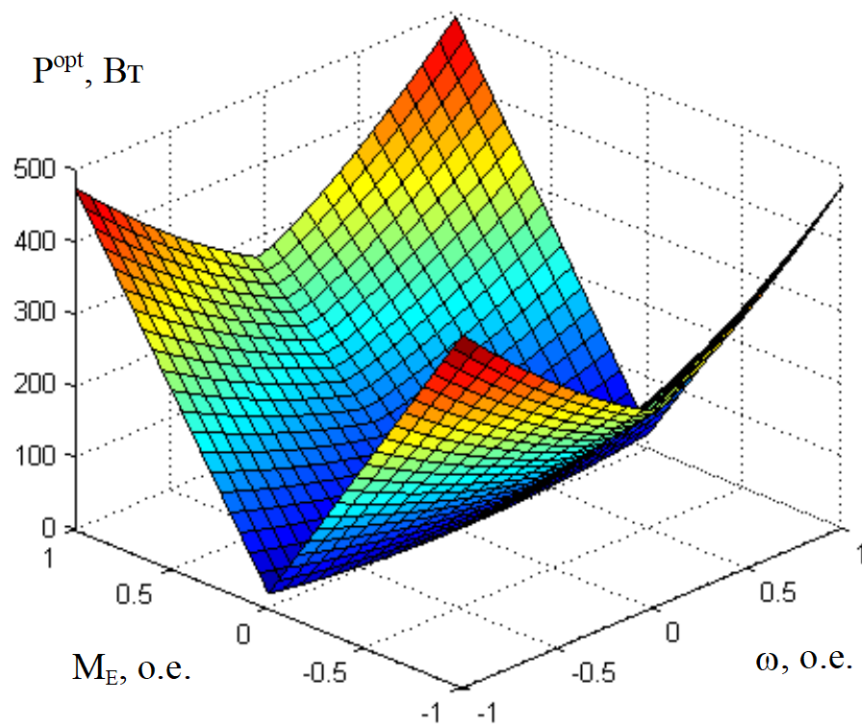


Рис.2. Потери мощности в АМ при оптимальном потоке ротора

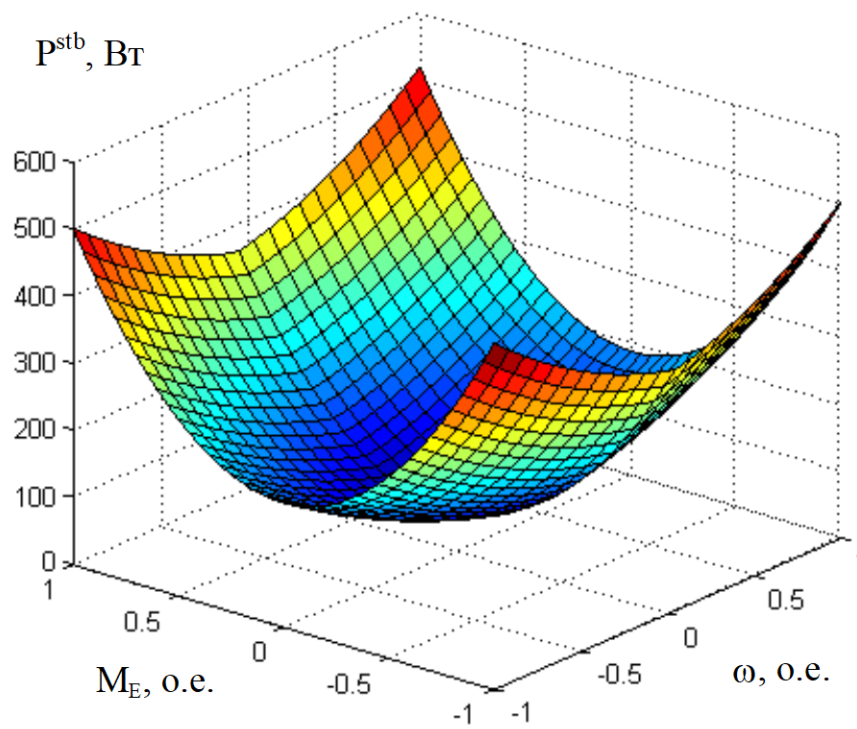


Рис.3. Потери мощности в АМ при номинальном потоке ротора

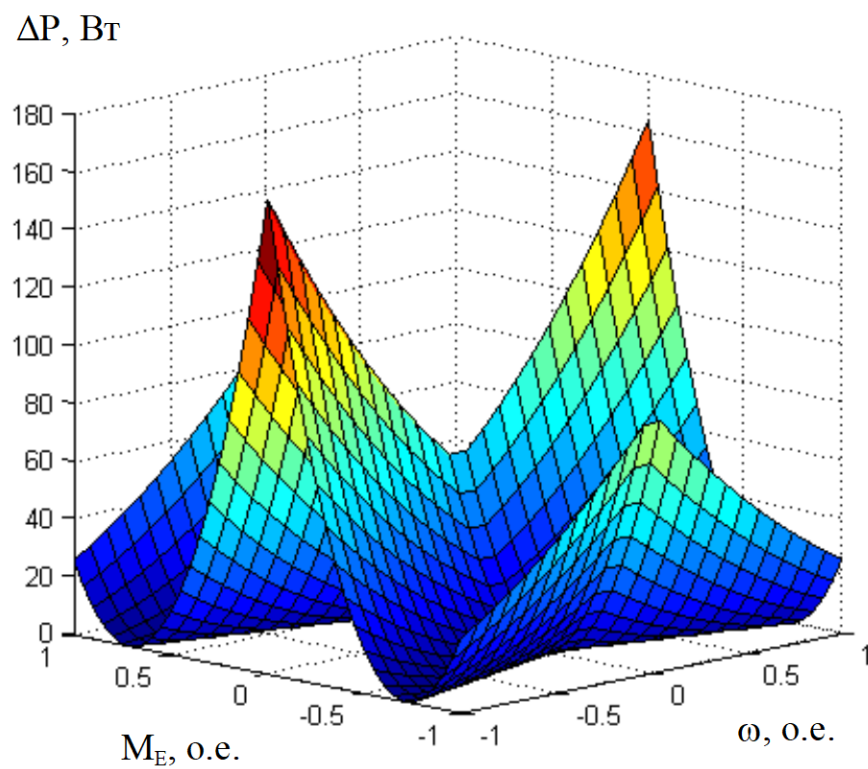


Рис.4. Экономия мощности при оптимальном управлении АМ

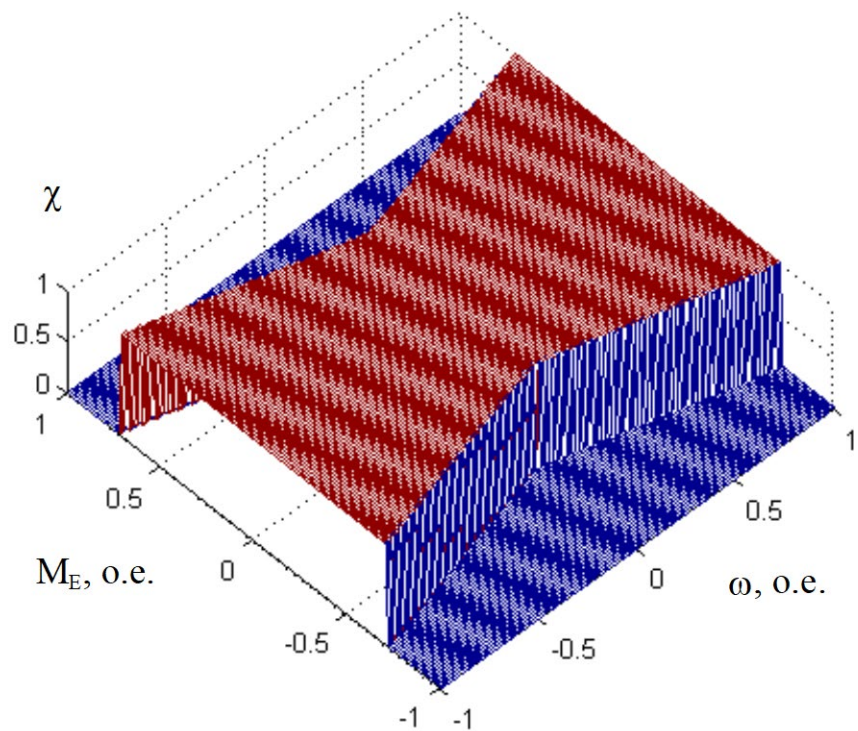


Рис.5. Зоны энергоэффективного управления АМ

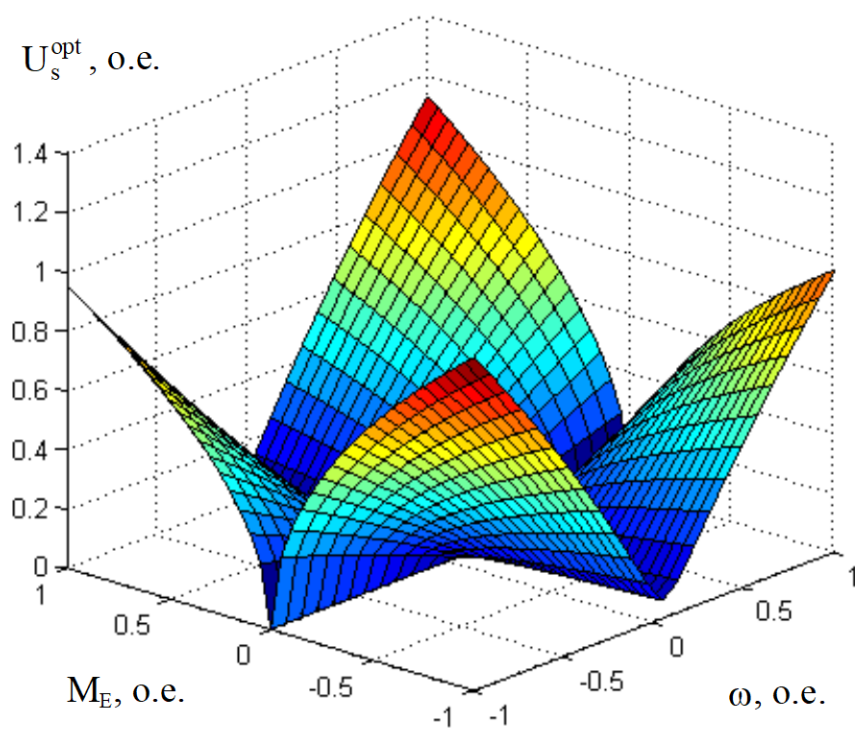


Рис.6. Напряжение статора АМ при оптимальном потоке ротора

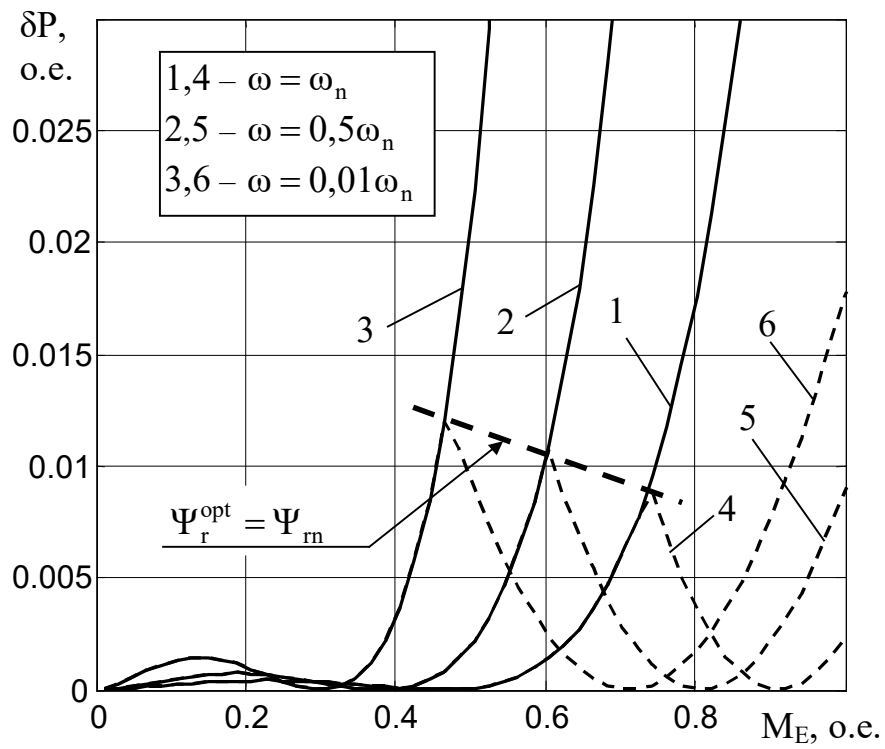


Рис.7. Ошибка оптимизации потерь мощности при $\Psi_r = \Psi_r^{opt}$ (кривые 1-3) и $\Psi_r = \Psi_r^{opt*}$ (кривые 4-6)

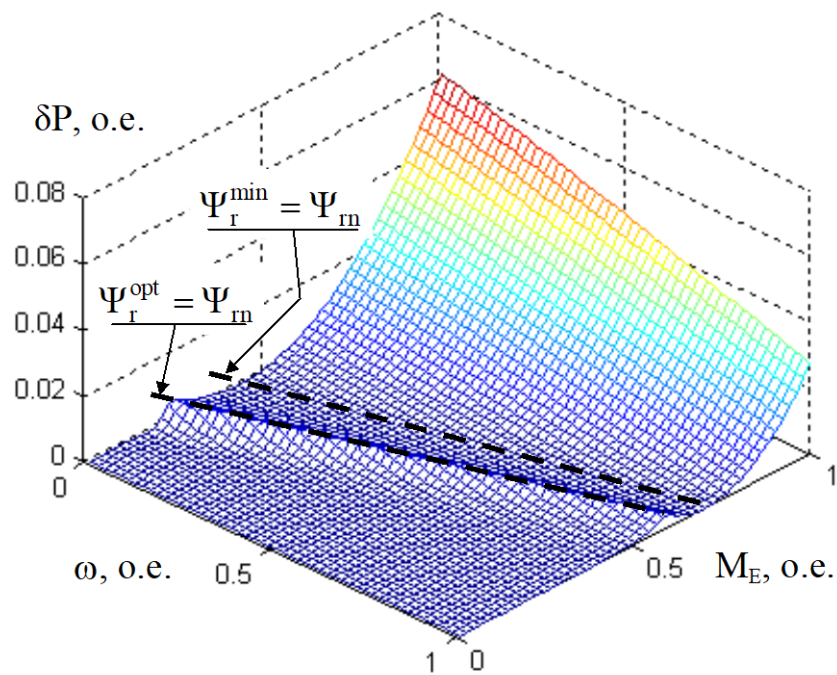


Рис.8. Ошибка оптимизации потерь при потоке $\Psi_r = \Psi_r^{opt*}$ для АМ мощностью 30 кВт